

ارزیابی اصول حاکم بر هیدرولیک جریان و طراحی سرریزهای پلکانی

حسین محمد ولی سامانی

دانشیار گروه عمران - دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز

محمدرضا نظرزاده

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران - دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز

(تاریخ دریافت ۸۱/۴/۱۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۲/۷/۱، تاریخ تصویب ۸۲/۱۱/۲۵)

چکیده

از اهداف طرح سرریز پلکانی^۱ می‌توان به افزایش شدت استهلاک انرژی در طول سرریز و در نتیجه کاهش ابعاد حوضچه آرامش اشاره نمود. این موضوع در توجیه اقتصادی طرح نیز اثر داشته و موجب کاهش هزینه‌ها خواهد شد. هیدرولیک جریان بر روی سرریزهای پلکانی اخیراً مورد توجه دانشمندان و محققین علوم آبی قرار گرفته و در دهه اخیر تحقیقات بیشتری در این زمینه صورت گرفته است. نتیجه این تحقیقات روابط هیدرولیکی متعددی در این زمینه می‌باشد. معادلات افت و ضریب اصطکاک در عمده روابط یاد شده بر اساس عمق متوسط بنا نهاده شده و یا اصولاً اعداد ثابتی برای ضریب اصطکاک ارائه شده است. در این تحقیق با جمع بندی کلی در خصوص روابط هیدرولیکی حاکم، به منظور استخراج رابطه‌ای برای ضریب اصطکاک ضمن در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی مؤثر محاسبات در قالب معادلات پروفیل سطح آب صورت گرفته و رابطه مورد نظر نتیجه‌گیری شده است. رابطه مذکور بر اساس داده‌های تجربی و با بکارگیری تکنیک بهینه‌سازی غیر خطی استخراج شده است. صحت و دقت نتایج حاصله بر اساس روابط پیشنهادی با مقایسه بانایج واقعی ارزیابی گردیده است.

واژه های کلیدی: سرریز پلکانی، ضریب اصطکاک، بهینه سازی غیر خطی، جریان ریزشی سطحی، کالیبراسیون و

ممیزی

مقدمه

بزرگترین سد با سرریز پلکانی ساخته شد. این سد پونت نام داشت [۵، ۷، ۸]. در سرریز سد نیوکورتن اولین شوت پله‌ای به منظور استهلاک انرژی اجرا گردید [۷، ۸]. علاوه بر این سدهای اپراستیلواتر، مونکسیول و استیج کوچ نیز دارای سرریز پلکانی می‌باشند. سدهای اخیر در حال حاضر در دست بهره برداری هستند [۷].

بطور کلی سه نوع جریان در روی سرریزهای پلکانی می‌توان مشاهده نمود. نوع اول جریان فواره ای^۲ که در آن جریان بصورت فواره های متوالی می‌باشد، نوع دوم جریان ریزشی سطحی^۳ که در آن جریان بصورت جریان متغیر تدریجی است و نوع سوم جریان انتقالی^۴ که در آن جریان بینابینی است و در صد قابل توجهی هوا با آن مخلوط شده است بعلاوه حالت ناپایدار دارد [۸، ۱۰]. معمولاً جریان نوع اول در دبی های کم اتفاق می‌افتد و جریان نوع دوم در دبی های زیاد رخ می‌دهد. در این تحقیق جریان نوع دوم که در سرریزهای پلکانی سدها متداول است مدل شده است. تحقیقات هیدرولیکی

برای مستهلک نمودن انرژی جنبشی در پایاب سدها معمولاً حوضچه آرامش احداث می‌شود. هرچه انرژی جنبشی منتقل شده به پائین دست بیشتر باشد حوضچه آرامش ابعاد بزرگتری خواهد داشت و یا تمهیدات بیشتری برای استهلاک انرژی در آن می‌بایست در نظر گرفت. در نتیجه به همان نسبت هزینه‌های اجرائی و نگهداری و نیز پایداری سد تحت تأثیر قرار می‌گیرد. سرریزهای پلکانی از جمله سازه‌هایی هستند که به منظور بهبود شرایط هیدرولیکی جریان و استهلاک انرژی بکار گرفته می‌شوند. با احداث این نوع سرریز ابعاد حوضچه آرامش و در نتیجه هزینه‌ها کاهش می‌یابند و در بعضی شرایط ممکن است منجر به حذف حوضچه آرامش گردد [۱۱]. سرریزهای پلکانی ۲۵۰۰ سال است که مورد توجه بوده‌اند و کهن‌ترین سرریزهای پلکانی جهان مربوط به رودخانه خسر در عراق می‌باشند. سپس رومی‌ها سدهائی را که در پایاب خود پلکان داشته‌اند احداث کردند. در سال ۱۷۹۱

$K_s = h \cos \theta$ = زبری که بصورت K_s تعریف می‌شود و h ارتفاع پلکان است.

$\sin \theta$ = شیب سرریز که در آن θ زاویه شیب سرریز با محور افق می‌باشد.

$$d = \text{عمق جریان}$$

در کلیه مطالعات قبلی پارامترهای مؤثر جریان در معادلات مربوطه بطور کامل لحاظ نشده‌اند. در مطالعات مذکور عمق متوسط جریان مبنای محاسبات بوده و در طول کل مسیر جریان سرریز از یک ضریب اصطکاک f میانگین استفاده شده است. آنچه این تحقیق را از سایر تحقیقات انجام شده متمایز می‌سازد اینست که عمق جریان در طول سرریز پلکانی ثابت فرض نشده و نیمرخ جریان با توجه به تئوری که ارائه خواهد شد محاسبه می‌شود. در هر مقطع در طول سرریز با توجه به شرایط هیدرولیکی جریان مقدار f تعیین و بر اساس آن عمق جریان محاسبه می‌شود. برای دستیابی به رابطه مناسب برای ضریب اصطکاک f با بررسی کلیه تحقیقات انجام شده و انجام مطالعات لازم سه پارامتر اصلی مؤثر برای معادله ضریب اصطکاک در نظر گرفته شد. این پارامترها

شامل زبری نسبی $\frac{K_s}{D_H}$ ، شیب آبراهه سرریز $\sin \theta$

و عدد فرود می‌باشند. در این راستا روابط مختلفی پیشنهاد گردید و برای تعیین ضرایب مربوطه از داده‌های آزمایشگاهی و تکنیک بهینه سازی غیر خطی استفاده بعمل آمده است.

فرضیات و متدولوژی

فرضیات اساسی مورد استفاده در این تحقیق بصورت زیر خلاصه می‌شود:

- ۱ - پلکانهای سرریز بصورت افقی و ساده و ابعاد آنها برای تمام پلکانها یکسان می‌باشد (شکل ۱).
- ۲ - شیب طولی سرریز ثابت است.
- ۳ - پروفیل بستر سرریز بدون انحنا بوده و لذا در معادلات حاکم اثر انحنا منظور نگردید. اما
- بدلیل شیب تند توزیع فشار غیرهیدرواستاتیک در نظر گرفته شده است.
- ۴ - جریان بر روی سرریز متغیر تدریجی است.

متعددی در خصوص جریان و پارامترهای هیدرولیکی مربوطه بر روی سرریزهای پلکانی انجام شده است. طی این تحقیقات روابط مختلفی برای نوع جریان و همچنین نحوه محاسبات افت و استهلاك انرژی در طول سرریزهای پلکانی ارائه شده است [۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۷، ۱۸]. در بسیاری از تحقیقات انجام شده قبلی برای محاسبه میزان افت و استهلاك انرژی در طول سرریزهای پلکانی مقادیر ثابتی برای ضریب اصطکاک پیشنهاد گردیده است [۱۳، ۱۷]. در برخی دیگر از مطالعات فوق جریان یکنواخت فرض شده و یا از عمق متوسط برای استخراج روابط استفاده شده است [۷، ۱۲، ۱۷، ۱۸]. در هیچ یک از کارهای انجام شده، محاسبات پروفیل سطح آب و تغییرات پارامترهای جریان در طول سرریز منظور نشده است. آقای چانسون با بکارگیری معادلات قبلی با مشخصات یاد شده و با انجام آنالیز آماری روابطی را استخراج نمود. این روابط در برگیرنده پارامترهایی از جریان می‌باشد که در معادله افت مؤثر هستند. مطالعات چانسون از کاملترین مطالعات انجام شده در زمینه جریان در سرریزهای پلکانی می‌باشد. یادآور می‌شود در معادلات نامبرده نیز کلیه پارامترهای مؤثر جریان منظور نشده است [۵، ۶، ۷، ۸، ۹]. در زیر به برخی از روابط قبلی ارائه شده برای معادله ضریب اصطکاک اشاره میشود:

رابطه چانسون

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.42 \ln \left(\frac{D_H}{K_s} \right) - 1.25$$

رابطه هارتونگ و شورلین

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -3.2 \log \left[(1.7 + 8.1 \sin \theta) \left(\frac{K_s}{D_H} \right) \right]$$

رابطه زمارین

$$f = 78.4 \left(\frac{1000}{52 - 5.1d/K_s} \right)^{-2}$$

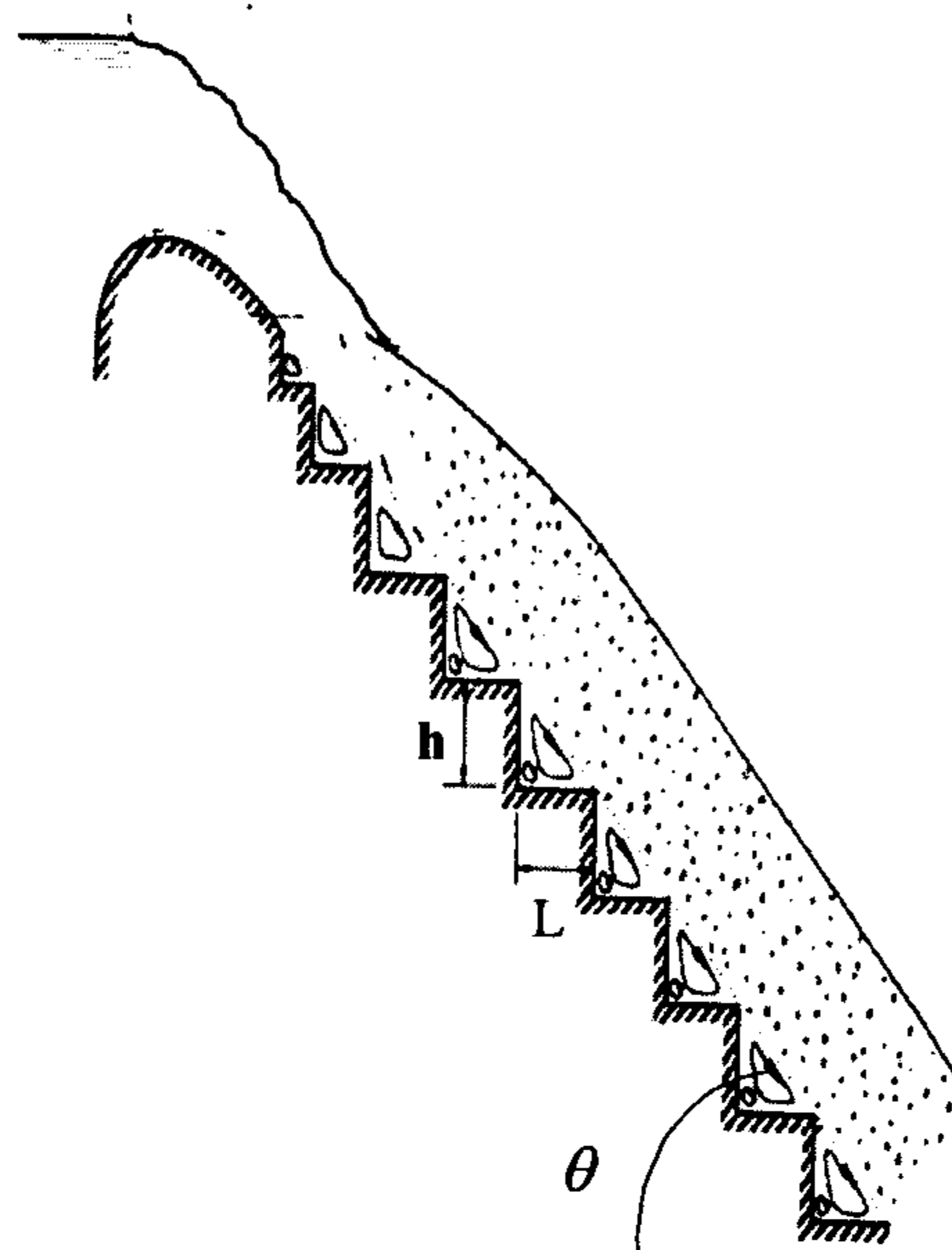
که در آنها:

$$f = \text{ضریب اصطکاک}$$

$$D_H = \text{قطر هیدرولیکی که طبق تعریف معادل چهار}$$

برابر شعاع هیدرولیکی است.

۵- مقطع کانال مستطیلی و با عرض ثابت فرض شده است.



شکل ۱: جریان بر روی سرریز پلکانی.

برای محاسبه پروفیل سطح آب از روش گام استاندارد استفاده شده است. معادلات مورد استفاده برای هر دو مقطع متوالی از تاج سرریز تا پایاب بصورت زیر خلاصه می شود:

$$H_1 - h_{f1-2} = H_2 \quad (1)$$

که در آن:

$$H_1 = Z_1 + d_1 \cos \theta + \frac{\alpha Q^2}{2gA_1^2} \quad (2)$$

$$H_2 = Z_2 + d_2 \cos \theta + \frac{\alpha Q^2}{2gA_2^2} \quad (3)$$

$$h_{f1-2} = \frac{1}{2}(S_{f1} + S_{f2})\Delta x \quad (4)$$

$$S_{f1} = \frac{f_1}{4R_{H1}} \left(\frac{Q^2}{2gA_1^2} \right) \quad (5)$$

$$S_{f2} = \frac{f_2}{4R_{H2}} \left(\frac{Q^2}{2gA_2^2} \right) \quad (6)$$

در این روابط :

$$A = \text{سطح مقطع جریان } g \text{ شتاب ثقل می باشد.}$$

$$Q = \text{دبی جریان}$$

$$\alpha = \text{ضریب تصحیح انرژی جنبشی}$$

$$h_{f1-2} = \text{افت انرژی بین مقاطع ۱ و ۲}$$

$$g = \text{شتاب ثقل}$$

$$\Delta x = \text{فاصله طولی بین دو مقطع ۱ و ۲}$$

$$H_1 \text{ و } H_2 \text{ به ترتیب انرژی در واحد وزن سیال مقاطع ۱ و ۲}$$

$$d_1 \text{ و } d_2 \text{ به ترتیب عمق های جریان عمود بر کف در مقاطع ۱ و ۲}$$

$$S_{f1} \text{ و } S_{f2} \text{ به ترتیب شیبهای خطوط انرژی در مقاطع ۱ و ۲}$$

$$f_1 \text{ و } f_2 \text{ به ترتیب ضرایب اصطکاک در مقاطع ۱ و ۲}$$

$$R_{H1} \text{ و } R_{H2} \text{ به ترتیب شعاع های هیدرولیکی در مقاطع ۱ و ۲}$$

غیر یکنواختی توزیع سرعت^۵ در جریان متلاطم در مقاطع مستطیلی تاثیر ناچیزی بر روی محاسبات انرژی جنبشی دارد. بنابر این ضریب تصحیح انرژی جنبشی α معمولاً برابر واحد فرض می شود [۱۹]. بهمین دلیل در این تحقیق ضریب مذکور برابر واحد در نظر گرفته شده است. شیب خط انرژی برای هر دو مقطع نشان داده شده در معادلات (۵) و (۶) بستگی به ضریب اصطکاک داشته و این ضریب با استفاده از رابطه پیشنهادی که متعاقباً ارائه خواهد شد برای مقطع مورد نظر محاسبه می گردد. در نهایت با حل معادلات فوق که در آن رابطه ضریب اصطکاک به صورت وابسته به پارامترهای جریان در نظر گرفته شده، میتوان ضمن محاسبه پروفیل سطح آب، انرژی مستهلک شده در طول سرریز پلکانی را محاسبه و با داده های اندازه گیری مقایسه نمود. با توجه به اینکه هدف تعیین رابطه مناسب برای ضریب اصطکاک بطریقی که حداقل اختلاف بین محاسبات و مشاهدات برقرار شود لذا تابع هدف بر این مبنا و به صورت زیر تعریف می گردد:

$$F = \text{Min} \sum_{i=1}^N (\Delta E_c - \Delta E_M)^2 \quad (7)$$

در این رابطه ΔE_c و ΔE_M به ترتیب استهلاک

مربوط به آزمایشهای هیدرولیکی انجام شده بر روی سرریز پلکانی است که از منابع مختلف در دسترس استخراج شده‌اند [۱۶،۷]. در این آزمایش ها پنج تیپ سرریز پلکانی با ابعاد مختلف ارائه شده در جدول (۲) بکار برده شده است. در این آزمایش ها دبی های متفاوت از روی سرریز ها بر قرار گردیده است. در هر آزمایش مقدار انرژی جریان در واحد وزن سیال در بالا دست سرریز تعیین و سپس با محاسبه مقدار تفاوت انرژی بین بالا دست سرریز و پائین دست آن مقدار استهلاك انرژی در طول سرریز تعیین می شود. تعداد سری داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده در این تحقیق ۲۰ سری بوده است. خلاصه اطلاعات و داده‌های مذکور در جدول (۱) ارائه شده اند [۱۶،۷].

شش سری آزمایش مختلف از مجموع ۲۰ سری آزمایشهای یاد شده برای انجام آزمون ممیزی^۹ رابطه مورد نظر کنار گذاشته شده اند و در کالیبراسیون از ۱۴ سری دیگر استفاده بعمل آمد. در مجموع ۲۳ گزینه روابط مختلف برای رابطه ضریب اصطکاک برای محاسبات منظور گردید و تابع هدف در فرآیند بهینه سازی، برای هر یک از گزینه‌های پیشنهادی مورد محاسبه واقع شد. نتایج بررسیهای بعمل آمده در جدول (۲) ارائه شده است.

بررسی نتایج و ممیزی

با بررسی دقیق گزینه‌ها، ملاحظه می شود که رابطه مربوط به گزینه ۱۴ دارای کمترین مقدار تابع هدف می‌باشد. در این گزینه بیشترین تعداد پارامترهای مؤثر یعنی هر سه پارامتر گفته شده لحاظ گردیده و از این جهت کاملترین گزینه می‌باشد. رابطه یاد شده بصورت زیر دوباره نویسی می‌شود.

$$f = 0.8154 \left(\frac{K_s}{D_H} \right)^{0.6916} (\sin \theta)^{-0.9} (Frd)^{-0.894} + 0.07712 \quad (8)$$

در رابطه فوق :

$\sin \theta$ معرف شیب طولی و با ابعاد پلکان دارای رابطه زیر است.

$$\sin \theta = \frac{h}{\sqrt{h^2 + l^2}} \quad (9)$$

انرژی محاسباتی و اندازه‌گیری شده در طول سرریز پلکانی و N تعداد آزمایشها می‌باشد.

تعیین روابط برای ضریب اصطکاک با استفاده از بهینه سازی غیر خطی

برای یافتن رابطه مناسب برای ضریب اصطکاک گزینه‌های متعددی از تمام ترکیبات ممکن و با در نظر گرفتن ضرائب و نماهای متغیر تدوین گردید. روش بهینه سازی غیر خطی برای تعیین ضرایب مجهول هر کدام از روابط پیشنهادی بکار برده شده است.

الگوریتم بکار رفته در برنامه کامپیوتری تهیه شده در این تحقیق برای تعیین ضرایب مجهول به صورت ذیل خلاصه می‌شود:

۱- ابتدا مقادیری برای ضرایب مجهول برای رابطه مورد نظر ضریب اصطکاک جهت استفاده در محاسبات پروفیل سطح آب حدس زده می‌شود.

۲- پروفیل سطح آب در طول سرریز پلکانی با توجه به معادلات ۱ تا ۶ محاسبه می‌شود.

۳- استهلاك انرژی بین ابتدا و انتهای سرریز محاسبه می‌شود.

۴- تفاوت بین استهلاك انرژی محاسبه شده در مرحله ۳ با استهلاك انرژی اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شود.

۵- گام های ۲ تا ۴ برای کلیه آزمایش های مورد نظر برای کالیبراسیون تکرار می‌شوند.

۶- تابع هدف پیشنهادی ارائه شده در رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

۷- با مراجعه به زیر برنامه بهینه سازی غیر خطی پاول^۶ مقادیر جدیدی برای ضرایب مجهول رابطه ضریب اصطکاک مورد نظر بر اساس جستجو^۷ در جهت های متعامد^۸ تعیین می‌شوند. [۱]

۸- گام های ۲ تا ۷ با بکار بردن مقادیر جدید برای ضرایب تکرار می‌شوند. این تکرار ها آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا مقدار حد اقل تابع هدف پیشنهادی در رابطه (۷) بدست آید. در اینصورت مقادیر بهینه ضرایب بدست آمده اند.

الگوریتم فوق برای هر کدام از روابط متعدد بکار برده شده اعمال گردیده است. داده های واقعی مورد استفاده

جدول ۱: داده‌های مورد استفاده.

ردیف	دبی (cms)	ارتفاع پلکان (m)	طول پلکان (m)	زاویه شیب سرریز (rad)	عرض (m)	ارتفاع سد (m)	استهلاک انرژی در طول سرریز (m)
1	21.12	0.64	0.96	0.588	9.6	9.6	5.48
2	39.168	0.64	0.96	0.588	9.6	9.6	4.48
3	54.528	0.64	0.96	0.588	9.6	9.6	40.7
4	71.04	0.64	0.96	0.588	9.6	9.6	4.02
5	21.12	0.8	1.2	0.588	9.6	9.6	5.5
6	39.168	0.8	1.2	0.588	9.6	9.6	4.54
7	54.525	0.8	1.2	0.588	9.6	9.6	4.14
8	71.04	0.8	1.2	0.588	9.6	9.6	4.22
9	21.12	0.96	1.44	0.588	9.6	9.6	5.52
10	39.168	0.96	1.44	0.588	9.6	9.6	4.67
11	54.525	0.96	1.44	0.588	9.6	9.6	4.33
12	71.04	0.96	1.44	0.588	9.6	9.6	4.44
13	1060.675	0.61	1.524	0.381	73.15	17.07	10.3
14	706.63	0.61	1.524	0.381	73.15	17.07	11.9
15	425.0	0.61	1.524	0.381	73.15	17.07	13
16	293.2	0.41	2.6	0.152	14.2	4.92	4.12
17	294.2	0.41	2.6	0.152	14.2	4.92	4.59
18	171.6	0.41	2.6	0.152	14.2	4.92	4.29
19	122.79	0.41	2.6	0.152	14.2	4.92	4.1
20	26.21	0.41	2.6	0.152	14.2	4.92	3.9

می‌گردد. انرژی باقیمانده که بایستی توسط حوضچه آرامش مستهلک گردد برای گزینه یاد شده $7/3$ متر می‌باشد. در این مطالعات با توجه به مدل هیدرولیکی بکار گرفته شده و با استفاده از داده‌های مدل در شرایط سرریز صاف و مقایسه داده‌ها، نتایج نشان می‌دهد که نسبت استهلاک انرژی بر روی سرریز صاف با همان اطلاعات ورودی معادل $7/4$ درصد و انرژی باقیمانده در پایاب در این شرایط $10/75$ متر می‌باشد. درصد تفاوت استهلاک انرژی در سرریز پلکانی نسبت به سرریز صاف بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{\Delta E_{st} - \Delta E_s}{\Delta E_{st}} \times 100$$

(۱۰)

در این رابطه:

 ΔE_{st} = استهلاک انرژی حاصل از سرریز پلکانی است. ΔE_s = استهلاک انرژی حاصل از سرریز صاف است.

رابطه (۱۱) در واقع نشان دهنده درصد استهلاک

انرژی اضافی سرریز پلکانی نسبت به سرریز صاف است.

که در آن h و l به ترتیب ارتفاع و طول پلکان

می‌باشند.

برای بررسی دقیق میزان استهلاک انرژی حاصل از بکارگیری معادله (۸) از داده‌های موجود و برنامه‌های کامپیوتری تهیه شده، استفاده بعمل آمد. اطلاعات ورودی در این بررسی بصورت زیر خلاصه می‌شود:

- دبی واحد عرض $q = 7.4 \text{ m}^2/\text{sec}$ - ارتفاع سد $H_{dam} = 9.6 \text{ m}$ - ارتفاع آب در بالادست $H_o = 1.82 \text{ m}$ - عرض سرریز $B = 9.6 \text{ m}$ - ارتفاع هر پلکان $h = 0.96 \text{ m}$ - طول هر پلکان $l = 1.44 \text{ m}$ - شیب آبراهه سرریز $1V: 1.5H$

نسبت استهلاک انرژی در طول سرریز با بکارگیری

رابطه ضریب اصطکاک یاد شده برای محاسبات ۳۷ درصد

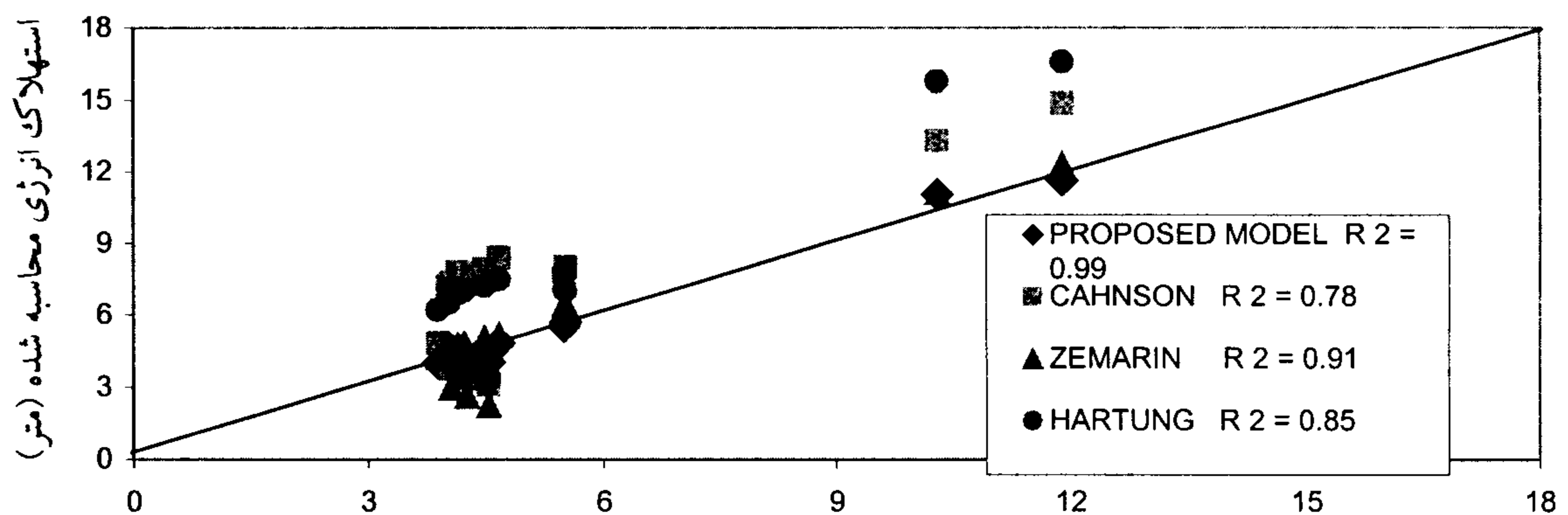
می‌باشد. نسبت استهلاک انرژی بصورت میزان استهلاک

انرژی در طول سرریز به انرژی بالا دست سرریز محاسبه

۱۱ محاسبه شده با استفاده از رابطه فوق حدود ۸۰ درصد مثال ۸۰ در صد انرژی بیش از سرریز صاف مستهلک می باشد. این بدین معنی است که سرریز پلکانی در این می نماید.

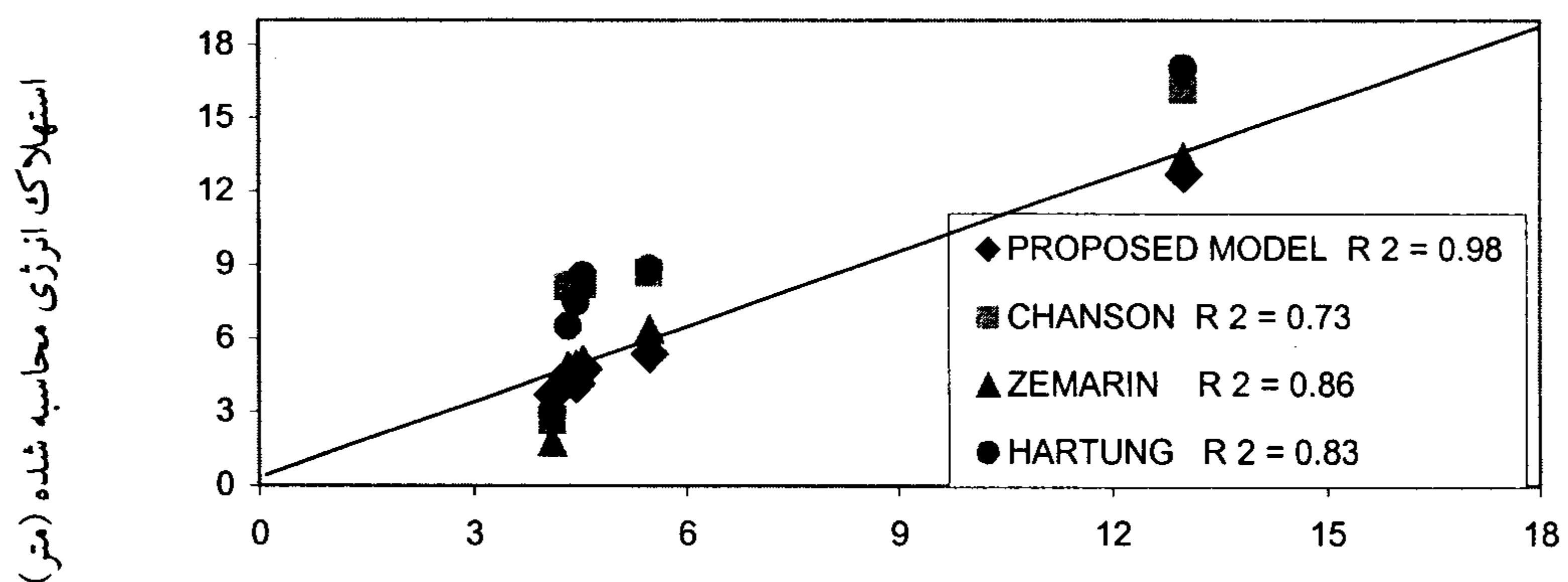
جدول ۲: نتایج کالیبراسیون روابط ضریب اصطکاک حاصل از بهینه سازی.

شماره گزینه	تابع پیشنهادی	مقدار تابع هدف رابطه (Y)
1	$f = 0.1212 \left(\frac{K_s}{D_H}\right)^{0.06142}$	5.3
2	$f = -1.313 \left(\frac{K_s}{D_H}\right)^{0.00503} + 1.436$	5.31
3	$f = 0.06903 (\sin\theta)^{-0.8046}$	3.4
4	$f = 0.0966 (\sin\theta)^{-0.561} - 0.0205$	3.2
5	$f = 0.3423 (\text{Frd})^{-0.3539}$	3.77
6	$f = 2.485 (\text{Frd})^{-2.496} + 0.1269$	2.17
7	$f = 0.09056 \left(\frac{K_s}{D_H}\right)^{0.6506} (\sin\theta)^{-1.586}$	3.7
8	$f = -0.1215 \left(\frac{K_s}{D_H}\right)^{-0.2893} (\sin\theta)^{0.2497} + 0.2284$	4.02
9	$f = 1.005 \left(\frac{K_s}{D_H}\right)^{0.2705} (\text{Frd})^{-0.63}$	3.1
10	$f = -1.15 \left(\frac{K_s}{D_H}\right)^{0.4369} (\text{Frd})^{-0.7541} + 0.05204$	3.7
11	$f = 0.06147 (\sin\theta)^{-0.7953} (\text{Frd})^{0.03982}$	3.34
12	$f = -0.8363 (\sin\theta)^{1.369} (\text{Frd})^{-0.812} + 0.1649$	4.65
13	$f = 0.6563 \left(\frac{K_s}{D_H}\right)^{0.4315} (\sin\theta)^{-0.5} (\text{Frd})^{-0.005}$	2.16
14	$f = 0.8154 \left(\frac{K_s}{D_H}\right)^{0.6916} (\sin\theta)^{-0.9} (\text{Frd})^{-0.894} + 0.07712$	1.17
15	$f = 0.9013 \left(\frac{K_s}{D_H}\right)^{0.03719} - 0.8735 (\sin\theta)^{0.2562}$	3.86
16	$f = 0.2383 \left(\frac{K_s}{D_H}\right)^{0.557} + 0.4504 (\sin\theta)^{0.2639} - 0.5315$	3.5
17	$f = 0.1598 \left(\frac{K_s}{D_H}\right)^{0.1598} + 1.138 (\text{Frd})^{1.534}$	2.4
18	$f = -1.125 \left(\frac{K_s}{D_H}\right)^{-0.0342} + 1.202 (\text{Frd})^{-1.125} + 1.242$	1.83
19	$f = 0.2587 (\sin\theta)^{1.73} + 1.293 (\text{Frd})^{-1.207}$	3.05
20	$f = 0.0503 (\sin\theta)^{-0.5} + 0.1112 (\text{Frd})^{-0.5} + 0.02326$	3.3
21	$f = 0.291 \left(\frac{K_s}{D_H}\right)^{1.538} + 0.06998 (\sin\theta)^{-0.2515} + 1.459 (\text{Frd})^{-2.18}$	5.3
22	$f = 0.0932 \left(\frac{K_s}{D_H}\right)^{1.07} + 0.06413 (\sin\theta)^{1.18} + 1.334 (\text{Frd})^{-0.05194} - 1.084$	4.21
23	$f = 0.1354$	5.23



استهلاك انرژی مشاهده شده (متر)

شکل ۲: مقایسه نتایج استهلاك انرژی حاصل بر اساس رابطه پیشنهادی و روابط دیگران با مقادیر اندازه گیری شده.



استهلاك انرژی مشاهده شده (متر)

شکل ۳: ممیزی رابطه پیشنهادی؛ مقایسه محاسبات و مشاهدات.

خلاصه و نتیجه گیری

احداث سرریزهای پلکانی بطور معنی داری در افزایش شدت استهلاك انرژی بر روی بدنه سرریز تأثیر دارد. برای محاسبه افت انرژی در طول سرریز نیاز به ارائه روابطی است که در برگیرنده شرایط خاص حاکم بر جریان باشد. روابط ارائه شده در مطالعات قبلی علیرغم ارائه یک تخمین اولیه، دقیق نبوده و نه تنها تأثیر کلیه پارامترهای جریان در روابط در نظر گرفته نشده بلکه روابط مذکور عمدتاً برحسب عمق متوسط استخراج شده‌اند. در این تحقیق با بکارگیری داده‌های اولیه حاصل از آزمایش در

مقایسه بین داده‌های محاسباتی حاصل از رابطه پیشنهادی و روابط قبلی در شکل (۲) مشاهده می‌گردد. همانگونه که اشاره شد آزمون ممیزی و تعیین دقت رابطه انتخابی بر مبنای شش سری از داده‌های مجزا که در کالیبراسیون مورد استفاده قرار نگرفته‌اند استوار بوده و بهمین منظور در شکل (۳) نتایج استهلاك انرژی محاسباتی و اندازه‌گیری شده ترسیم و با هم مقایسه شده‌اند. نتایج مذکور با توجه به ضرایب همبستگی منعکس شده در شکل های (۲) و (۳) حاکی از دقت مطلوب رابطه پیشنهادی و نزدیکی به واقعیت بوده است.

f :	ضریب اصطکاک
f_1 :	ضریب اصطکاک در مقطع ۱
f_2 :	ضریب اصطکاک در مقطع ۲
Frd :	مربع عدد فرود
g :	شتاب ثقل
H_1 :	انرژی در واحد وزن سیال مقطع ۱
H_2 :	انرژی در واحد وزن سیال مقطع ۲
h :	ارتفاع هر پلکان
h_{f1-2} :	افت انرژی بین مقاطع ۱ و ۲
Ks :	ضریب اصطکاک که بصورت $Ks = h \cos \theta$ تعریف می‌شود
l :	طول هر پلکان
N :	تعداد آزمایشها
q :	دبی در واحد عرض
Q :	دبی جریان
R_{H1} :	شعاع هیدرولیکی در مقطع ۱
R_{H2} :	شعاع هیدرولیکی در مقطع ۲
S_{f1} :	شیب خط انرژی در مقطع ۱
S_{f2} :	شیب خط انرژی در مقطع ۲
Z :	ارتفاع نسبت به سطح مبنا
$\sin \theta$:	شیب سرریز که در آن θ زاویه شیب سرریز با محور افق می باشد
α :	ضریب تصحیح انرژی جنبشی
ΔE_c :	استهلاک انرژی محاسباتی در طول سرریز
ΔE_M :	استهلاک انرژی اندازه‌گیری شده در طول سرریز
ΔE_{st} :	استهلاک انرژی حاصل از سرریز پلکانی
ΔE_s :	استهلاک انرژی حاصل از سرریز صاف
Δx :	فاصله طولی بین دو مقطع پشت سرهم
η :	درصد تفاوت استهلاک انرژی در سرریز پلکانی نسبت به سرریز صاف

خصوص هیدرولیک جریان بر سرریزهای پلکانی و انجام تحلیل هیدرولیکی خاص جهت محاسبات پروفیل سطح آب، روابط مورد نظر برای ضریب اصطکاک در گزینه‌های متعدد فرض شده و به کمک تکنیک بهینه سازی غیرخطی بهترین رابطه برای آن استخراج گردید. در این تحلیل یک رابطه کلی که خاص جریانهای سطحی پیوسته بدست آمد که در آن ضریب اصطکاک بصورت تابعی از عدد فرود، زبری نسبی و شیب طولی سرریز می باشد. این تابع در محاسبات پروفیل سطح آب در روی سرریز مقطع به مقطع باتغییر این پارامترها تغییر می کند. در ممیزی روابط حاصله نشان داده شد که تفاوت نتایج مدل با نتایج اندازه‌گیری‌های واقعی اندک است. این موضوع نشان دهنده توان تکنیک به کار برده شده و دقت معادلات بدست آمده می‌باشد. نتایج بررسیهای بعمل آمده در خصوص رابطه پیشنهادی نشانگر آنست که با اجرای سرریز پلکانی می‌توان شدت استهلاک انرژی را بطور قابل ملاحظه‌ای بالا برد. همچنین می‌توان قضاوت نمود که در شرایط احداث سرریز پلکانی می‌توان ابعاد حوضچه آرامش و یا مستهلک کننده‌های دیگر کاهش داد. این موضوع در توجیه اقتصادی کل طرح بسیار مؤثر می‌باشد. برای ادامه این تحقیق می‌توان روی تاثیر ابعاد و اشکال مختلف پله ها تحقیق نمود و همچنین استفاده از مدل ریاضی عددی حل معادلات هیدرودینامیک جریان متلاطم دو بعدی و سه بعدی می‌تواند زمینه مناسبی برای ادامه این تحقیق باشد.

فهرست علائم

A :	سطح مقطع جریان
B :	عرض سرریز
D_H :	قطر هیدرولیکی
d :	عمق جریان عمود بر کف
F :	تابع هدف

مراجع

- 1 - Box, M. J. (1966). "A comparison of several current optimization methods, and use of transformation in constrained problems." *The Computer Journal*.
- 2 - Chamani, M. R. and Rajartnam, N. (1994). "Jet flow on stepped spillways." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 2, PP. 254 - 259.

- 3 - Chamani, M. R. and Rajartnam, N. (1999). "Characteristics of skimming flow over stepped spillways." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 125, No. 4, PP. 361-368.
- 4 - Chamani, M. R. and Rajartnam, N. (1999). "Onset of skimming flow on stepped spillways." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 125, No. 9, PP. 969-971.
- 5 - Chanson, H. (1993a). "Self - aerated flows on chutes and spillways." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 119, No. 2, PP. 220 - 243.
- 6 - Chanson, H. (1993b). "Stepped spillway flows and air entrainment." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, No. 3, PP. 422 - 435.
- 7 - Chanson, H. (1994). *Hydraulic Design of Stepped Channels and Spillways*. The University of Queensland Report ch43/94.
- 8 - Chanson, H. (1996). "Prediction of the transition nappe / skimming flow on a stepped channel." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 34, No. 30.
- 9 - Chanson, H. (1996). *Investigation of the Gold Greek Dam Spillway, Australia*. The University of Queensland Report CE153.
- 10 - Chanson, H. (2001). "A transition flow regime on stepped spillways: the facts." *In Proceedings 29th IAHR Congress*, Beijing, China.
- 11 - Chanson, H. (2001). "Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators." *Dam Engineering*, Vol. 11, No. 4, PP. 205-242.
- 12 - Chanson, H. and Toombes, L. (2002). "Energy dissipation and air entrainment in a stepped water way: an experimental study." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, Vol. 128, No. 5, PP. 305-315.
- 13 - Chanson, H., Yasuda, Y. and Ohtsu, I. (2000). "Flow resistance in skimming flow: a critical review." *International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*, Zurich, Switzerland, H.E. Minor & W.H. Hager, Editors, Balkema Publ., PP. 95-102.
- 14 - Essery, I. T. S. and Horner, M. W. (1978). "The hydraulic design of stepped spillways." *CIRIA Report No. 33*, 2nd edition, Jan., London, U.K.
- 15 - Frizell, K. H. (1992). "Hydraulics of stepped spillways for RCC dams and dam rehabilitations." *Proc. Of the 3rd Specialty Conf. on Roller Compacted Concrete, ASCE*, San Fran.
- 16 - Nuiwen, P. and Yiming, X. (1996). "Hydraulic characteristics of stepped spillway." *Stochastic Hydraulics 96*, Balkema, Rotterdam. ISBN 90 54108177. PP. 549 - 552.
- 17 - Rajartnam, N. (1990). "Skimming flow in stepped spillways." *J. of Hyd. Eng., ASCE*, Vol. 116, No. 4, PP. 587 - 591.
- 18 - Stephenson, D. (1991). "Energy dissipation down stepped spillways." *Water Power and Dam Construction*, Sept., PP. 27 - 30.
- 19 - Ven Te Chow. (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw Hill Book Company.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | |
|--------------------------------------|---|
| 1 – Stepped Spillway | 2 – Nappe Flow |
| 3 – Skimming Flow | 4 – Transition Flow |
| 5 – Nonuniform Velocity Distribution | 6 – Powel Nonlinear Optimization Method |
| 7 – Searching | 8 – Conjugate Directions |
| 9 – Verification | |